金属泡沫中填充石蜡的相变换热特性实验研究

张嘉杰，屈治国*

(热流科学与工程教育部重点实验室，西安交通大学能源与动力工程学院，陕西 西安 710049)

摘 要：本文对金属铜泡沫填充石蜡的相变换热特征进行了实验研究，通过测试试件加热面及内部的温度响应曲线，分析了金属泡沫填充及自然对流对石蜡非稳态相变换热过程的影响。研究结果表明，采用顶部加热方式时，石蜡内部的换热以纯导热为主，而采用底部加热时，液态石蜡内的自然对流作用使相界面移动速度更快，试件内部温度一致性更好，同时在相变对流区可实现对加热面的温度控制。金属泡沫的填充可强化石蜡内的导热但抑制液态石蜡的自然对流，前者使得试件加热面温升减缓，相界面移动加快，后者则导致底部加热时石蜡的相变区分为相变导热区和相变对流区。金属泡沫的导热强化能力在试件换热中占据主导作用。

关键词：石蜡；金属泡沫；相变区；自然对流

中图分类号：TK124　　　　**文献标识码：**A

Experimental study on the heat transfer of metal foam filled in paraffin

ZHANG Jia-Jie　QU Zhi-Guo*

(MOE Key Laboratory of Thermal Fluid Science and Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract: In this study, the thermal performance of paraffin saturated open cell metal foam was experimentally investigated by tracking the heated surface and internal temperatures. The effects of metal foam and natural convection on heat transfer in paraffin were discussed. The results showed that the heat conduction played a dominant role for the case of top heating. For the case of bottom heating, the natural convection in liquid paraffin led to the quicker phase change interface movement and more uniform internal temperature. Meanwhile, the temperature of heated surface was controlled in a small range in the phase change-convection zone. The inclusion of metal foam greatly improved the thermal conductivity of paraffin but suppressed the liquid nature convection. The former resulted in the slower temperature rising of heated surface and quicker phase change interface movement. The latter led that the phase change zone can be divided into the phase change-conduction zone and phase change-convection zone for the bottom heating. The enhanced heat conduction due to the fill of metal foam played a dominant role in the heat transfer of paraffin.

Key words: paraffin; metal foam; phase change zone; nature convection

0 引言

随着电子器件的逐步微型化及工作功率的不断提高，电子器件的热管理问题成为制约其发展的主要瓶颈之一。固液相变材料在其熔化过程中可以吸收大量的相变潜热，同时温度维持在很小的范围内，这一特性使其在电子器件热管理应用方面有巨大的应用价值[1-4]。由于电子器件的工作温度通常不能太高，因此应用于电子器件温控的相变材料通常为相变温度较低的有机类相变材料，其具有潜热大、化学特性稳定的优点。但是，常用的有机相变材料导热系数普遍较低，通常为0.1-0.3W•m^{-1}•K^{-1}，这使得其潜热吸收或释放速率很慢，严重限制了其能量转化效率。针对这一问题，近年来发展出许多强化换热方法用以提高相变材料的导热系数，如在相变材料内添加金属翅片、石墨或金属多孔结构、高导热系数粉末等[5]。

Huang等[6]通过在石蜡中添加铝翅片作为热沉，对其应用于太阳能电池板的热控制效果进行实验研究，结果显示翅片数量的增加可以强化石蜡内的热传导，更好的实现对热沉系统的温度控制，从而提高太阳能电池板的蓄电效率。Lafdi等[7, 8]将铝泡沫嵌入到石蜡中以增强其导热性能，通过实验和数值方法研究了泡沫特性、热沉形状等参数对冷却效果的

收稿日期：2017-05-30

基金项目：国家自然科学基金(No. 51676153), 111 计划 (B16038), 万人计划青年拔尖人才支持计划

作者简介：张嘉杰(1988)，男，讲师，博士，主要从事相变换热应用研究。

通信作者：屈治国，教授，Email: zgqu@xjtu.edu.cn

影响。Mesalhy等[9]对相变材料填充于碳泡沫的换热特性进行了研究。结果表明，高导热系数及高孔隙率泡沫的加热面温度较低，这是由于此种工况下加热面的热量能更好的传递出去。Zhang等[10, 11]对相变微胶囊板内添加高导热碳纤维的换热进行了实验和数值研究，结果表明，碳纤维的添加明显强化了复合板内的换热，使得相界面移动速度加快，试件整体的温度一致性更好。

针对相变材料导热系数低的缺陷，本文以石蜡作为工质，对金属铜泡沫填充石蜡的非稳态换热特征进行了实验研究，分析了金属泡沫填充、加热方向及加热功率等因素对石蜡相变换热过程的影响。

1 实验系统

1.1 实验装置

当前实验选用商用石蜡作为相变材料，采用差示扫描量热仪(DSC，TA-Q20)对其潜热物性进行测试。图1所示为该石蜡的测试结果，其相变潜热为141.2J/g，相变温度区间为42.46℃-59.62℃，相变峰值为49.22℃，其余物性参数由生产厂家提供，示于表1中。所采用的金属泡沫为铜泡沫，尺寸为100mm×100mm×80mm，其孔隙率为0.98(孔体积占总体积的份额)，孔密度为10PPI(单位英寸材料上的孔数目)。

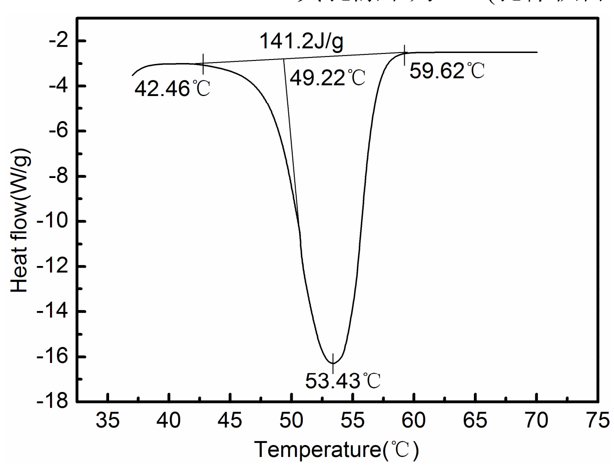


图1 石蜡DSC测试曲线

Fig. 1 DSC tested results of paraffin

表1 石蜡物性参数

Table 1 Physical properties of paraffin

物性	值
密度(kg·m-3)	785.02
固相导热系数(W·m-1·K-1)	0.30
液相导热系数(W·m-1·K-1)	0.10
比热容(J·kg-1·K-1)	2850
动力粘度(kg·m-1·s-1)	3.65×10^{-3}
热膨胀系数(K-1)	3.085×10^{-4}

图2所示为实验装置示意图，主要包括测试段、加热段与数据采集段三部分。图3(a)所示为测试段的示意图。将熔化的石蜡注入的金属铜泡沫中，待石蜡凝固后将该复合结构(金属泡沫+石蜡)置于一个有机玻璃方腔内，方腔底部放置一块6mm厚的铝板作为加热面，铝板上方贴覆电加热膜提供热源，铝板下方则采用聚氨酯板(导热系数为0.02 W•m-1•K-1)进行绝热。

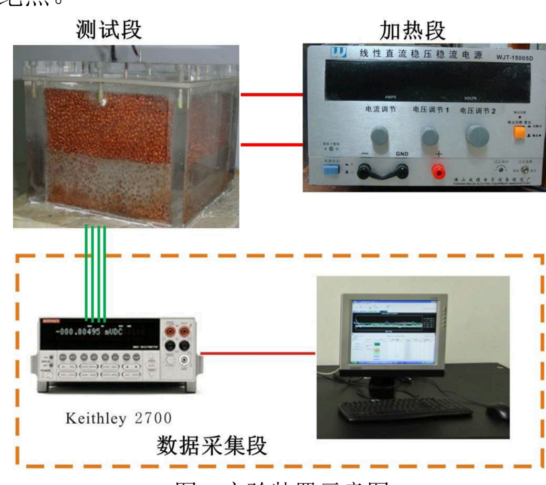
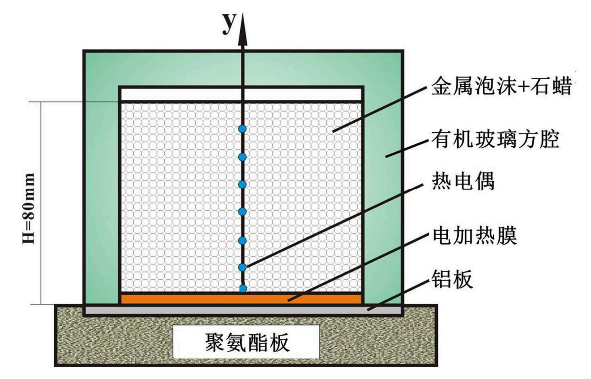


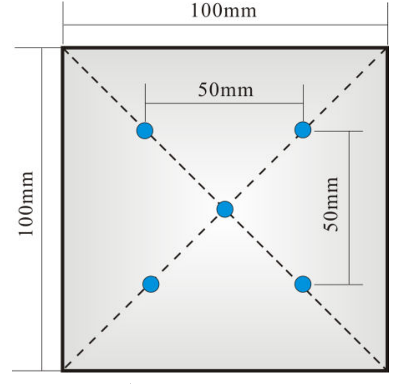
图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup





(a) 实验测试段



(b) 加热面热电偶布置

图3 实验测试段示意图

Fig. 3 Schematic of test section

当前实验中电加热膜的热流密度通过线性电源设置为5000W/m^2。实验中共采用12根T型热电偶来测量试件的温度变化，其中5根热电偶用于测量加热面的温度，布置方式如图3(b)所示，数据处理时加热面的温度取为五个点的平均值；剩余7根热电偶用于测量试件内部温度。为了便于测量试件内部温度，在试件中心钻取一个直径为3mm的通孔，然后从试件加热面开始每隔10mm布置一根热电偶，共布置有7个测点，如图3(a)所示。实验过程中每隔5分钟对热电偶数据进行一次记录，数据记录采用Keithley2700数据采集器。实验测量误差主要包括热电偶测量误差(0.1℃)，线性电源误差(1.22%)以及电加热膜功率误差5%。

1.2 实验工况

为了分析金属泡沫对石蜡熔化过程的影响，实验对比进行了纯石蜡工况与金属泡沫填充石蜡的工况。同时，为了研究石蜡熔化后自然对流的影响，分别考虑了底部加热与顶部加热两种方式，其中顶部加热方式是将图3(a)所示的实验测试段上下倒置所实现。四种实验工况汇总于表2中。实验初始温度与环境温度均为25℃，实验中各工况均加热至石蜡完全熔化。为了避免加热面温度超过电加热膜的耐温限制，顶部加热时纯石蜡工况C1的实验持续时间为60min。

表2 实验工况

Table 2 Test cases

工况	试件	加热方式
C1	石蜡	顶部加热
C2	石蜡	底部加热
C3	泡沫+石蜡	顶部加热
C4	泡沫+石蜡	底部加热

2 实验结果与分析

2.1 相界面移动特征

当前实验通过两种方法记录石蜡熔化过程中的相界面移动。第一种是根据试件内部热电偶测点所记录的温度，当某一热电偶测点的温度达到相变峰值温度49.22℃时，则认为相变界面移动到该测点位置。第二种是利用数码相机拍摄石蜡熔化过程中的相界面可视化图片，然后利用标尺获得其直观相界面位置。图4所示为工况C2和C3采用两种方法获得的相界面随时间变化规律。可以看到，两种方法获得的相界面变化规律符合较好，这也验证了采用温度测量相界面方法的正确性。

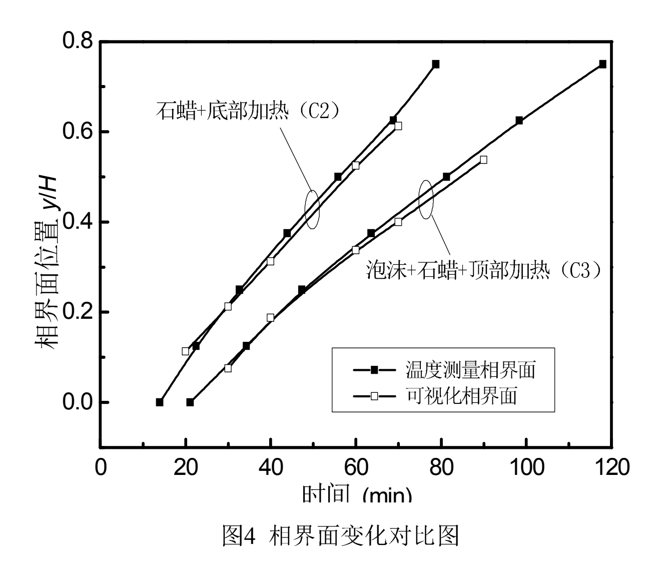


图4 相界面变化对比图

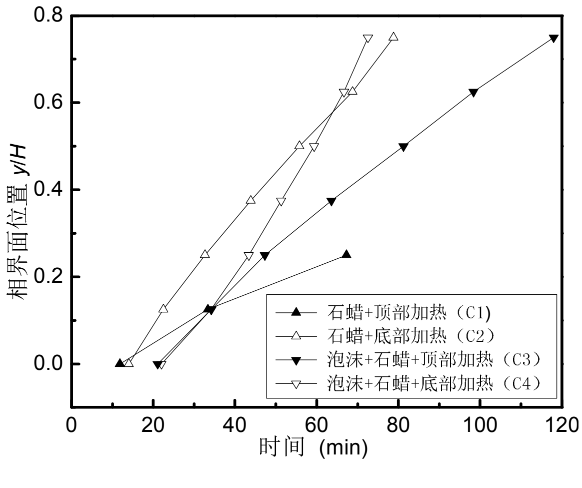
Fig. 4 Comparison of the phase change interface movement

图5(a)所示为根据热电偶测温获得的各工况相界面变化曲线。可以看到，纯石蜡顶部加热工况(C1)的相界面移动速度最慢，这是由于顶部加热工况时石蜡熔化后的自然对流换热很弱所致；相较而言，纯石蜡底部加热工况(C2)的相界面移动速度明显加快，这说明液态石蜡的自然对流换热可明显强化石蜡内部的换热，加快相界面移动速度。同理，金属泡沫填充石蜡的底部加热工况(C4)的相界面移动速度也明显快于泡沫石蜡的顶部加热工况(C3)。图5(c)与(d)的相界面可视化图像也反映出工况C4的相界面移动快于工况C3，同时工况C4的相界面不如工况C3平整，这是由于金属泡沫的填充对底部加热时液态石蜡的自然对流扰动所致。对比图5(a)中顶部加热工况C1与C3，或底部加热工况C2与C4，可以看到，由于金属泡沫的填充可明显提高石蜡内的导热过程，因此其相界面移动速度明显快于纯石蜡工况。综上，四种工况相界面移动速度从慢到快依次为：C1、C3、C2、C4。

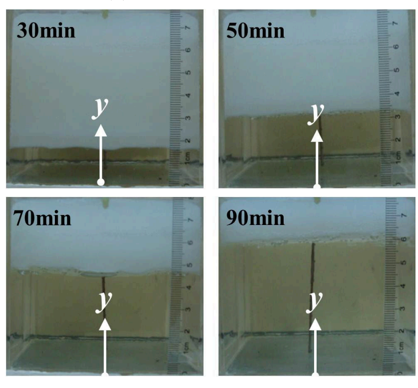
此外，从图5(a)中注意到，纯石蜡工况C1与C2的相变起始时间均为10min；相对而言，填充金属泡沫工况C3与C4的相变起始时间较晚，均为20min。这也导致，在相变前期(t<70min)工况C2的相界面位置(图5(b))要明显高于工况C4(图5(d))，尽管前者的相界面移动速度慢于后者。

2.2 加热面温度响应特征

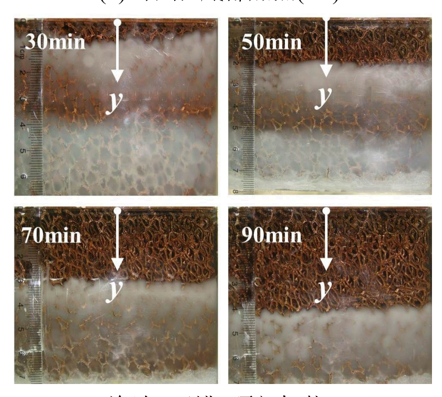
图6所示为各工况加热面温度随时间的变化曲线。首先分析顶部加热的两种工况C1与C3，可以看到，两种工况下，试件加热面的温度近乎成线性增长，这是由于采用顶部加热时，熔化后石蜡内部的自然对流很弱，因此其换热方式以导热为主。由上



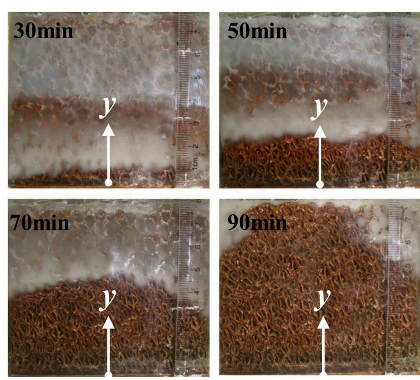
(a) 相界面变化曲线



(b) 石蜡+底部加热(C2)



(c) 泡沫+石蜡+顶部加热(C3)



(d) 泡沫+石蜡+底部加热(C4)

图 5 各工况相界面变化

Fig. 5 Phase change interface movement for all cases

节的图5(a)可知，工况C1和工况C3的石蜡相变起始点分别为10min与20min，结合图6可以看出，从该相变起始点开始，由于石蜡熔化过程中的潜热吸收，使得工况C1和C3的加热面温度增长速度均减缓。此外，金属泡沫填充石蜡工况C3的温升速度明显慢于纯石蜡工况C1，这是由于金属泡沫的填充强化了石蜡内部的热传导，使得加热面附近的热量可以及时传递至试件内部，因此其温升速度相对较慢，以60min为例，工况C3的加热面温度相较于C1下降了110℃。

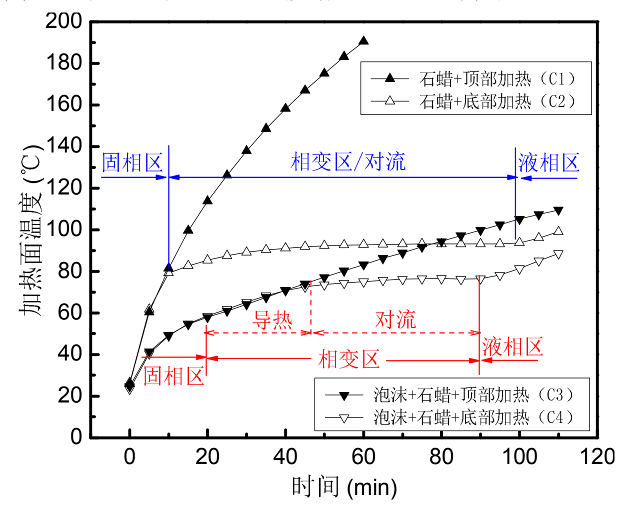


图6 各工况试件加热面温度随时间的变化曲线

Fig. 6 Heated surface temperature variations with time for different experimental conditions

分析纯石蜡底部加热工况C2，其加热面温度变化特征可以分为三个阶段：固相区、相变对流区、液相区。在固相区(0-10min)，由于试件内传热以导热为主，因此其加热面的温度曲线与纯石蜡顶部加热工况C1的温度曲线几乎完全重合。在相变对流区(10-100min)，工况C2与C1的温度曲线开始分离，此后底部加热工况C2的温度增长趋势明显减缓。这是因为对于底部加热工况C2，随着石蜡熔化后，液态石蜡内部的换热以自然对流为主；同时石蜡熔化的潜热吸收也进一步减慢了加热面的温升速度，二者的共同作用使得工况C2在相变对流区的温升十分缓慢(80-90℃)，呈现出明显的温控特性。当相变材料完全熔化后，工况C2进入液相区，此后加热面的换热量完全以显热吸收，故其温升速度又开始增大。

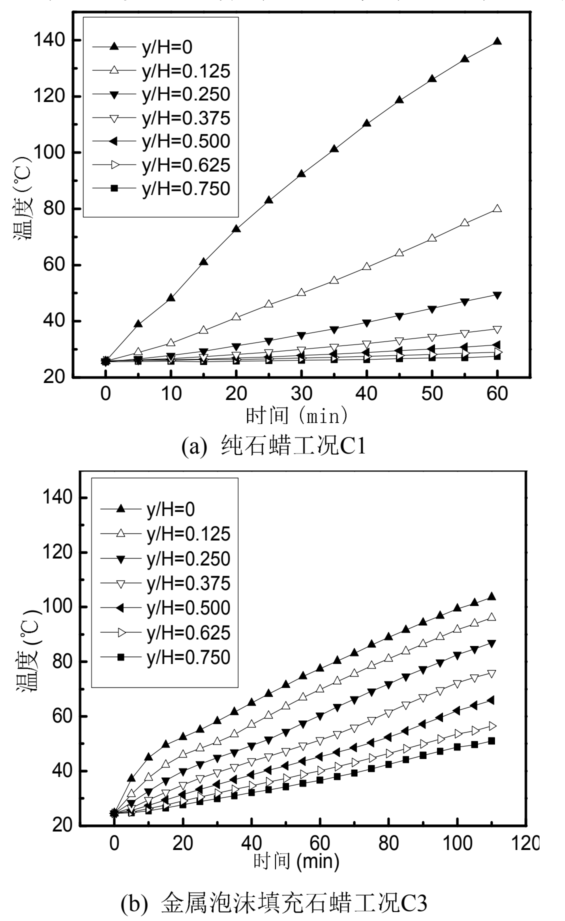
分析金属泡沫填充石蜡底部加热工况C4，在固相区(0-20min)，底部工况C4与顶部工况C3的温度曲线重合。在相变区(20-90min)，不同于纯石蜡工况C2与C1的分离，泡沫填充工况C4与C3在相变区的前期(20-45min)温度曲线仍然重合，二者在相变区的后期(45-90min)温度才开始逐渐分离。造成这一现象的原

因是金属泡沫的填充抑制了石蜡熔化后的自然对流。因此，工况C4的相变区可进一步细分为相变导热区(20-45min)和相变对流区(45-90min)，在相变导热区，试件内的换热仍以导热为主；而在相变对流区，随着液态石蜡的增多，换热以自然对流为主，该阶段内试件加热面呈现出明显的温控特性(73-77℃)。当石蜡完全熔完后，则换热进入液相区。综上，金属泡沫填充石蜡底部加热工况C4的加热面温度响应可以分为四个区：固相区、相变导热区、相变对流区、液相区。

此外，对比底部加热工况C2与C4发现，在给定时刻，泡沫填充工况C4的温度明显低于纯石蜡工况C2，这说明尽管金属泡沫的填充抑制了液态石蜡的自然对流换热，但是泡沫骨架对石蜡的强化导热作用仍占据主导。这同时也导致工况C4的温控时间(45-90min，也即相变对流区的持续时间)明显短于工况C2(10-100min)。

2.3 内部温度响应特征

图7所示为顶部加热时工况C1与C3的试件内部温度变化曲线。可以看到，由于顶部加热时，石蜡



(a) 纯石蜡工况C1

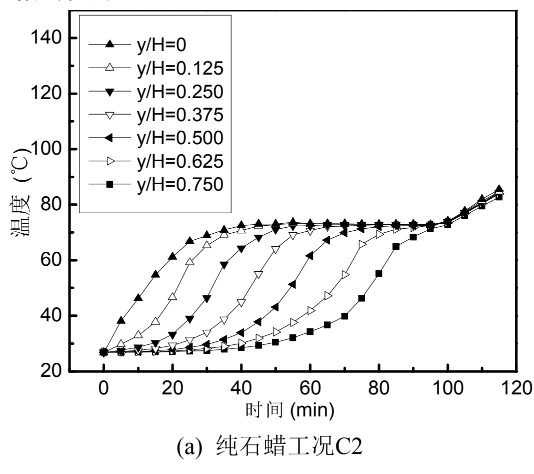
(b) 金属泡沫填充石蜡工况C3

图7 顶部加热时试件内部温度变化曲线

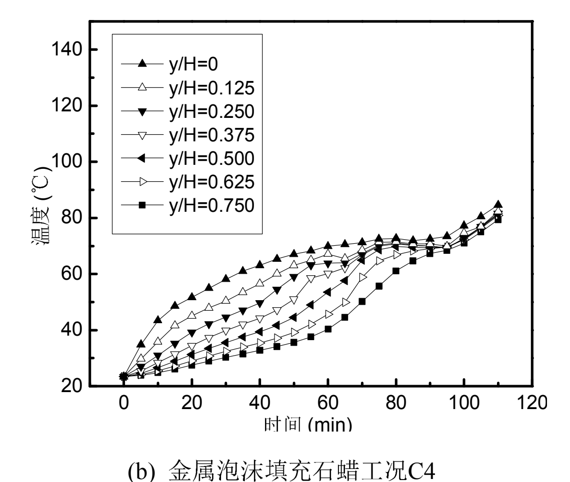
Fig. 7 Internal temperature variations for top heating

熔化后的自然对流很弱，因此两种工况下石蜡内部的温度曲线基本呈线性增长。由图7(a)可知，对于纯石蜡工况C1，在给定时刻，试件内部靠近加热面处(y/H=0)各点间的温差明显大于靠近背热面附近(y/H=0.75)各点间的温差。这是由于石蜡极低的导热系数(见表1)使得其加热面处的热量集聚，因而此处的温度梯度很大；而背热面处由于传递过来的热量很少，使得此处的温度梯度很小。图7(b)则显示，填充金属泡沫工况C3的内部各点间的温差基本一致。这是由于金属泡沫的高导热性能极大提高了石蜡内部的导热能力，使得其内部温度场分布更为均匀。

图8所示为底部加热时工况C2与C4的试件内部温度变化曲线。相较于顶部加热工况(图7)，底部加热工况时石蜡熔化后的液相自然对流现象更强烈，因此试件内部温度分布更均匀。对比图8(a)与(b)发现，石蜡内部填充金属泡沫后，金属泡沫的高导热能力使得石蜡内部的温度一致性更好，因而各点的温差相对更小。



(a) 纯石蜡工况C2



(b) 金属泡沫填充石蜡工况C4

图8 底部加热时试件内部温度变化曲线

Fig. 8 Internal temperature variations for bottom heating

3 总结

本文主要对金属泡沫填充石蜡时的相变换热特征进行实验研究，分析了金属泡沫填充及自然对流对试件非稳态温度响应及相界面变化特征的影响。所得主要结论如下：

(1) 采用顶部加热方式时，石蜡内部的换热以纯导热为主，温度增长为线性趋势；而采用底部加热时，由于液态石蜡内的自然对流作用，试件加热面温度增长更慢，相界面移动速度更快，且试件内部温度一致性也更好。

(2) 金属泡沫的填充可强化石蜡内的导热，推迟石蜡相变起始时间，降低试件加热面温度，加快相界面移动速度，试件内部温度一致性也更好。特别对于底部加热工况，金属泡沫的填充抑制了液态石蜡的自然对流，这导致石蜡的相变区分解为相变导热区和相变对流区，而纯石蜡工况仅存在相变对流区。但相对于金属泡沫对液态石蜡自然对流的抑制，其对石蜡的导热强化能力在试件换热中仍占据主导地位。

参考文献

[1] Warzoha R J, Weigand R M, Fleischer A S. Temperature-dependent thermal properties of a paraffin phase change material embedded with herringbone style graphite nanofibers[J]. Applied Energy, 2015, 137:716-725.

[2] Han Y, Luan W, Jiang Y, et al. Protection of electronic devices on nuclear rescue robot: Passive thermal control[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101:224-230.

[3] 张嘉杰, 屈治国, 马素霞, 杨艳霞. 空心铝合金结构填充相变材料的换热特性[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 1845-1851.

Zhang J J, Qu Z G, Ma S X, et al. Heat transfer performance of hollow aluminium structure filled with PCM[J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 1845-1851.

[4] Li W, Wan H, Lou H, et al. Enhanced thermal management with microencapsulated phase change material particles infiltrated in cellular metal foam[J]. Energy, 2017, 127:671-679.

[5] 朱教群, 宋轶, 周卫兵等. 基于碳材料的有机复合相变材料导热增强研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(2): 213-222.

Zhu J Q, Song Y, Zhou W B, et al. The use of carbon materials for enhancing heat transfer of organic based composite phase change materials : A review[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(2):213-222.

[6] Huang M, Eames P, Norton B, et al. Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95 (7): 1598-1603.

[7] Lafdi K, Mesalhy O, Elgafy A. Merits of employing foam encapsulated phase change materials for pulsed power electronics cooling applications[J]. Journal of Electronic Packaging, 2008, 130 (2): 021004.

[8] Lafdi K, Mesalhy O, Shaikh S. Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102 (8): 083549.

[9] Mesalhy O, Lafdi K, Elgafy A. Carbon foam matrices saturated with PCM for thermal protection purposes[J]. Carbon, 2006, 44 (10): 2080-2088.

[10] Zhang J J, Qu Z G, Jin Z G. Experimental study on the thermal characteristics of a microencapsulated phase-change composite plate[J]. Energy, 2014, 71: 94-103.

[11] Zhang J J, Qu Z G, Liu Y. Numerical study on the melting thermal characteristics of a microencapsulated phase change plate[J]. Numerical Heat Transfer Part A Applications, 2016, 70(4):399-419.